

# 智能化在水利水电工程管理中的应用

王志国

220821\*\*\*\*\*0331

**摘要:** 随着物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术的迅猛发展,智能化转型已成为水利水电工程管理现代化的核心驱动力。本文系统阐述了智能化技术在水利水电工程全生命周期管理中的创新应用。首先,在引言部分分析了传统工程管理模式面临的挑战与智能化发展的必然趋势。正文部分依次深入探讨了智能化在工程勘察设计、智能建造与施工管理、智慧运营与安全监控、以及综合决策与应急调度等关键环节的应用模式与技术架构,通过具体案例与核心技术(如BIM、智能感知、机器学习、数字孪生等)的结合,揭示了智能化如何提升设计精度、施工效率、运营安全与管理效能。文章最后总结了当前应用面临的挑战,并对未来技术融合与体系化发展进行了展望。研究表明,智能化深度应用将从根本上重塑水利水电工程管理的范式,为实现工程安全、高效、绿色与可持续发展提供坚实保障。

**关键词:** 水利水电工程; 智能化管理; 数字孪生; BIM; 智能感知; 智慧运营; 人工智能

**DOI:** 10.69979/3060-8767.26.04.038

## 引言

水利水电工程作为关乎国计民生的重大基础设施,具有规模宏大、结构复杂、建设周期长、运行环境多变、社会影响深远等特点。传统的工程管理方法高度依赖人工经验、纸质流程和离散的数据系统,在工程设计优化、施工过程精准控制、设施全生命周期健康诊断以及应对极端气候与复杂水文情势的应急调度等方面,逐渐暴露出信息滞后、协同困难、决策科学性不足、风险预警能力薄弱等瓶颈。尤其在当前全球气候变化加剧、水资源供需矛盾突出、社会对工程安全与生态效益要求日益提高的背景下,提升水利水电工程管理的精细化、智能化与智慧化水平,已迫在眉睫。

新一轮科技革命为这一转型提供了历史性机遇。以物联网(IoT)为核心的泛在感知网络,实现了工程要素状态的实时采集与互联;云计算提供了海量数据存储与弹性计算能力;大数据技术使得从多源异构数据中挖掘深层价值成为可能;人工智能(AI)与机器学习(ML)赋予了系统预测、诊断与自主优化决策的智能;而数字孪生(Digital Twin)与建筑信息模型(BIM)技术,则通过构建与物理实体精准映射、虚实互动的数字模型,为工程全生命周期管理提供了革命性的平台。这些技术并非孤立存在,而是深度融合,共同构成水利水电工程智能化管理的技术基石。

## 1 智能化技术在勘察设计与仿真模拟中的应用

工程的起点在于勘察与设计,这一阶段的决策质量直接影响整个项目的成败。智能化技术在此阶段的应用,正从辅助工具演变为驱动设计创新的核心引擎。

首先,基于遥感(RS)、无人机(UAV)与激光雷达(LiDAR)的“空天地”一体化智能勘察体系已得到广泛应用。无人机搭载高精度传感器,可快速获取库区、坝址、输水线路的高分辨率地形、地貌及影像数据,效率远超人工作业。结合地理信息系统(GIS)和人工智能图像识别技术,能够自动解译地质构造、滑坡体、植被覆盖等信息,甚至初步识别潜在的地质风险点,为选址和线路优化提供数据支撑。

其次,建筑信息模型(BIM)技术是设计阶段智能化的核心载体。不同于传统的二维图纸,BIM构建起包含几何信息、物理属性、功能特性的三维参数化模型。在水利水电工程中,从大坝、厂房、泄水建筑物到错综复杂的廊道、管线,均可实现全专业、一体化的三维协同设计。这极大减少了“错、漏、碰、缺”等设计冲突,提升了设计质量<sup>[1]</sup>。更重要的是,BIM模型是一个富含信息的数据库,为后续的施工、运营阶段提供了唯一、准确的数据源。

更进一步,基于BIM模型和高性能计算的设计仿真与优化,将智能化推向深入。工程师可以集成水文、水力、结构、岩土等多专业仿真软件,在数字空间中对工程方案进行反复的“虚拟试验”。例如,通过计算流

体动力学（CFD）模拟不同洪水工况下溢洪道、消能工的水流流态与空化空蚀风险；利用有限元分析（FEA）模拟大坝在不同荷载组合下的应力应变响应；甚至可以通过耦合的地质力学模型，分析高边坡、地下洞室群的稳定性。机器学习算法更可以在此基础上，通过分析海量仿真数据，自动寻找结构最优形态、材料最佳配比等，实现从“经验设计”到“智能优化设计”的跨越。

## 2 智能建造与施工过程的精细化管理

施工阶段是蓝图变为现实的关键环节，其管理复杂度极高。智能化建造旨在通过技术手段，实现施工过程的实时感知、动态优化与精准控制。

物联网与智能传感网络是施工现场的“神经系统”。在混凝土坝施工中，预埋在坝体内的分布式光纤测温传感器、应变传感器，可实时监测混凝土的水化热温度场和应力发展，指导温控措施，防止温度裂缝。高精度GPS、北斗定位与传感器集成于施工机械（如碾压机、摊铺机），能够实时反馈碾压遍数、轨迹、厚度与压实度，确保填筑质量。无人驾驶的碾压机群、自动化摊铺设备，可在预设的数字模型引导下进行协同作业，提升效率与安全性<sup>[2]</sup>。

BIM模型在施工阶段进化为4D（三维+时间）和5D（三维+时间+成本）管理工具。通过将施工进度计划与BIM模型构件关联，可以可视化地模拟整个施工流程（4D施工模拟），提前发现工序衔接、空间冲突等问题，优化施工方案。结合资源与成本信息，则能实现成本的动态跟踪与精确管控（5D）。现场管理人员通过移动终端，可随时调取BIM模型与图纸，进行技术交底、质量验评与问题追溯。

人工智能与计算机视觉在安全与质量管理中大放异彩。部署在施工现场的视频监控系统，通过AI算法可以自动识别工人未佩戴安全帽、未系安全带、危险区域闯入等不安全行为，并实时报警。对施工工艺的关键环节，如钢筋绑扎间距、模板支护合规性等，也可通过图像识别进行自动化检查。此外，基于大数据分析，可以对历史安全事故数据进行挖掘，预测当前施工阶段的高风险因素，实现主动式安全管理。

数字孪生技术则为施工全过程的虚实交互与协同管理提供了核心支撑。通过构建施工现场的数字孪生体，将物理世界的施工进度、资源状态、环境参数等实时映射到虚拟模型中，管理人员可在数字空间中对施工过程

进行全局监控、进度推演和问题诊断。例如，当实际施工进度与计划出现偏差时，数字孪生系统能自动分析偏差原因，并结合资源配置情况提出优化调整建议。同时，施工各方基于同一数字孪生平台进行远程协同，实时共享信息、解决技术难题，有效打破传统施工管理中信息孤岛和沟通壁垒，大幅提升施工组织效率和决策响应速度。此外，结合区块链技术，可对施工过程中的关键数据如材料进场检验记录、工序验收报告等进行存证，确保数据的不可篡改和可追溯，为工程质量责任认定提供可靠依据<sup>[3]</sup>。

## 3 工程运营期的智慧监控与安全诊断

水利水电工程投入运营后，其长期安全稳定运行是核心目标。智能化技术构建了“感知-分析-预警-决策”一体化的智慧运营与安全管控体系。

感知层由覆盖工程全域的智能监测网络构成，包括用于变形监测的GNSS和测量机器人、用于渗流渗压监测的智能传感器、用于结构振动与声发射监测的传感器阵列、以及视频监控、水文水质在线监测设备等。这些传感器7x24小时不间断采集数据，并通过物联网网关汇聚至云端或数据中心。

数据分析与智能诊断是智慧运营的大脑。传统的数据处理方式多限于阈值报警，而人工智能与大数据技术则能实现更深层次的健康诊断与预测性维护。例如，利用长期积累的变形、渗压、应力监测数据，通过统计学方法、机器学习模型（如支持向量机、随机森林、深度学习网络），可以建立大坝等水工建筑物健康状态的“数字画像”或“正常性态模型”。实时监测数据一旦与模型预测值发生系统性偏离，系统便能提前发出异常预警，而非等到物理指标超限。机器学习还能从多源监测数据中挖掘隐含的相关性，识别可能导致结构性态异常的潜在模式，实现故障源的初步定位<sup>[4]</sup>。

数字孪生技术在此阶段扮演了“虚拟镜像”的角色。一个与物理工程同步更新、双向交互的高保真数字孪生体被建立起来。它实时接收来自物理世界的监测数据，驱动模型进行仿真计算，从而在虚拟空间中动态反映大坝、厂房等结构的实际工作性态。运维人员可以在数字孪生体上进行各种“假设分析”，如模拟遭遇超标准洪水时大坝的泄洪安全裕度，或评估库区滑坡体失稳对建筑物的冲击影响，为制定应急预案提供科学依据。数字孪生体成为连接物理世界与管理决策的桥梁，使得运营

管理从“事后反应”转变为“事前预演”和“事中调控”。

#### 4 综合决策支持与智慧应急调度

水利水电工程往往承担着防洪、发电、供水、灌溉、生态等多重目标，其调度决策涉及复杂的多目标优化问题，且需要在极端天气、突发事件下做出快速、科学的响应。智能化技术为构建强大的综合决策支持系统（DSS）与应急指挥平台提供了可能。

在防洪调度方面，结合气象雷达、卫星云图与数值天气预报，利用水文模型与人工智能预测算法，可以实现流域降雨和洪水过程的精细化预报。基于数字孪生平台，可以快速模拟不同预泄方案、闸门开启组合下的库区水位、下游河道行洪过程，在保障大坝安全的前提下，寻求最优的削峰错峰方案，最大化防洪效益。

在水电能源调度与市场交易中，依托大数据和机器学习算法，可以更精准地预测短期与中长期来水情况、电网负荷需求以及电力市场价格波动<sup>[5]</sup>。智能调度系统能够综合考虑水库蓄能、机组效率、电网约束和市场规则，自动生成或推荐经济效益最优的发电计划，参与电网的自动发电控制（AGC）和辅助服务市场，提升电站的运营收益与电网的稳定性。

面对地震、极端暴雨、恐怖袭击等突发事件，智慧应急指挥系统能基于数字孪生和情景推演技术，快速评估事件影响范围与程度（如溃坝洪水演进模拟），自动生成人员疏散、工程抢险、物资调配的初步方案，并通过融合通信系统将指令下达到一线。系统还能整合社会面数据（如人口分布、交通路网），为跨部门、跨区域的协同应急提供一体化信息视图和决策支持，显著提升应急响应的速度与效能。

#### 5 结语

从基于 BIM 与 AI 的精细化设计，到物联网与机器人驱动的智能建造；从基于数字孪生与机器学习的预测性运维，到依托大数据与模型推演的智慧调度，智能化技术已渗透到工程生命周期的每一个环节，其核心价值在于实现了从依赖静态图纸和人工经验的传统模式，向以数据为驱动、模型为核心、智能为特征的数字化、网络化、智能化管理新范式的根本性转变。

然而，也必须清醒地认识到，当前智能化应用仍面临诸多挑战：首先是“数据孤岛”问题，勘察、设计、施工、运营各阶段的数据标准不一、系统异构，难以顺畅流通与融合；其次是模型与算法的可靠性问题，特别是人工智能模型在复杂水文地质条件下决策的“黑箱”特性与可解释性有待提高；再次是网络安全风险，高度互联的智能系统使其成为网络攻击的潜在目标，安全保障体系亟待强化；最后是复合型人才短缺，既懂水利水电专业又精通信息技术的跨界人才严重不足。

展望未来，水利水电工程的智能化发展将呈现以下趋势：一是技术融合将进一步深化，边缘计算、5G/6G 通信、区块链等新技术将与现有技术体系更紧密集成，构建更实时、更安全、更协同的智能体。二是平台化与标准化成为关键，推动建立统一的工程数据标准与开放的智能管理平台，打破信息壁垒。三是人工智能将向更具解释性、鲁棒性和自主性的方向发展，成为工程管理不可或缺的“智能伙伴”。四是从单体工程智能化向流域尺度的“智慧流域”管理演进，实现跨工程、跨区域的水资源联合调度与系统性风险管控。

坚定不移地推进智能化转型，不仅是提升水利水电行业核心竞争力的必然选择，更是保障国家水安全、能源安全和生态安全，推动新阶段水利高质量发展的战略举措。唯有主动拥抱变革，在实践中不断探索与创新，方能驾驭智能化巨轮，驶向更加安全、高效、绿色、和谐的水利水电工程未来。

#### 参考文献

- [1] 许林春. 智能化技术在水利水电工程施工管理中的应用与研究[J]. 全面腐蚀控制, 2025, 39(10): 257-259.
- [2] 甄楠楠. 智能化施工技术在水利工程管理中的应用[J]. 智慧中国, 2025, (09): 116-117.
- [3] 李静. 智能化管理系统在水利水电工程中的应用[J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S1): 174-175.
- [4] 张盼. 智能化管理系统在水利水电工程项目中的应用探讨[J]. 科技与创新, 2025, (05): 204-207.
- [5] 王凤波, 李洪军. 智能化技术在水利工程管理中的应用研究[J]. 水上安全, 2025, (05): 28-30.